

В. П. СТЯЖКІН, канд. техн. наук, ст. наук. співр., Інститут електродинаміки НАНУ, Київ;
В. І. ТЕРЯЄВ, канд. техн. наук, доц., Національний технічний університет України «КПІ»;
С. І. ГАВРИЛЮК, аспірант, Інститут електродинаміки НАНУ, Київ

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ ЧАСТОТНОГО КЕРУВАННЯ ДЛЯ ДУГОСТАТОРНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ АНТЕН СУДНОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ РЛС

Вступ. Суднові навігаційні РЛС використовуються для визначення координат і параметрів руху різних надводних і берегових об'єктів, берегової лінії та інших перешкод, здатних відбивати радіохвилі, які випромінює і приймає антена. Це дозволяє забезпечити безпеку мореплавання в обмежених умовах видимості, безпечне розходження суден, визначення місця судна по відомим береговим або плавучим орієнтирам.

Одним з головних механізмів будь-якої РЛС є антена, обертання якої здійснюється електроприводом (ЕП). ЕП суднової РЛС повинен забезпечити високу стабільність швидкості обертання при різкозмінному вітровому навантаженні, хитах судна та в несприятливих кліматичних умовах. Також до електроприводу РЛС висувається ряд вимог, таких як надійність, технічний ресурс роботи понад 20 років, ремонтоздатність, висока точність відпрацювання в секторному режимі, коли в межах одного оберту змінюється швидкість, та інші.

В [1,2] показано доцільність застосування дугостаторного асинхронного двигуна (ДАД) для суднових навігаційних РЛС, статор якого складається з декількох індукторів, а ротор виконаний у вигляді феромагнітного диску з короткозамкненою обмоткою. Основними перевагами ЕП на базі ДАД є простота і надійність, виключення редуктора із кінематичного ланцюга, можливість інтегрування в існуючі РЛС та збільшення потужності за рахунок селективного включення індукторів в роботу. Водночас дугостаторний двигун має ряд особливостей та недоліків – м'які механічні характеристики за рахунок збільшеного повітряного проміжку, низькі коефіцієнти корисної дії та потужності, крайові ефекти, викривлення картини поля, насичення магнітопровода.

Застосування стандартного закону частотного керування для ДАД в нижній частині діапазону регулювання призводить до посилення його недоліків – різкого зменшення критичних зусиль та жорсткості механічних характеристик [3]. **Метою статті** є розробка нових модифікованих методів частотного керування, які враховують особливості дугостаторних двигунів.

Постановка задачі. Особливості характеристик ДАД пов'язані зі специфікою електромагнітних процесів, які викликані розімкнутим магнітопроводом, а також ефектами «входу–виходу» електромагнітного поля, зумовленими переходом елементарних провідних контурів вторинного елемента (ВЕ) з крайової зони в активну і з активної – в крайову [4].

Розімкненість магнітопровода ДАД призводить до відхилення від синусоїдальної форми розподілу потоку в ярмі та індукції в повітряному зазорі. Спотворення картини магнітного поля погіршує тягові та енергетичні характеристики машини. Через нерівномірність розподілу поля уздовж машини котушки обмоток різних фаз знаходяться у неоднакових магнітних умовах, що призводить до асиметрії ЕРС у фазах обмоток індуктора. Це тягне за собою виникнення асиметрії фазних струмів при живленні машини від джерела із симетричною системою напруг. ДАД мають великий повітряний проміжок, що пояснюється особливістю їх конструкції. Ефект послаблення магнітного поля у збільшеному зазорі, а також по товщині ВЕ називається товщинним. Він призводить до збільшення намагнічувального струму ДАД у порівнянні зі звичайними обертовими двигунами. Вторинне магнітне поле, обумовлене струмами вторинного елемента, значно впливає на сумарний магнітний потік в зазорі машини. Навіть при русі ВЕ з синхронною швидкістю відносно поля, в ньому виникають струми і втрати, викликані наявністю границь індуктора, тобто явищами «входу–виходу». Виникаючі при цьому зусилля можуть бути як гальмівними, так і рушійними [4].

Особливості роботи ДАД, обумовлені реакцією ВЕ, отримали назву вторинного поздовжнього крайового ефекту, а особливості, що мають місце при відсутності реакції вторинної частини – первинного крайового ефекту. В цілому сукупність розглянутих особливостей електромагнітних процесів у машинах з роз'єднаними магнітопроводами отримала назву поздовжнього крайового ефекту (ПКЕ). Найбільший вплив мають ПКЕ, особливо для ДАД з малим числом полюсів і великим значенням відношення реактивності намагнічуючого контуру до приведенного вторинного опору – електромагнітної добротності машини. Це призводить до появи додаткових складових струмів і вторинних втрат біля країв осердя, подальшого зниження ККД і тягового зусилля машини [4].

Зазначені вище особливості електромагнітних процесів ДАД необхідно приймати до уваги при розробці та дослідженні законів керування ним. Можна сформулювати наступні критерії вибору методу керування ДАД, які враховують його конструктивні особливості та умови використання для електроприводу РЛС:

- переважна робота на низьких швидкостях та частотах;
- необхідність збільшення жорсткості механічної характеристики та критичного моменту, особливо в нижній частині діапазону регулювання;
- врахування впливу насичення магнітного ланцюга ДАД при синтезі алгоритмів методів керування;

- застосування методів регулювання, які не потребують безпосереднього керування складовими магнітного потоку;
- енергозбереження в умовах обмежених енергоресурсів джерела живлення;
- забезпечення полоси пропускання привода, достатньої для відпрацювання пульсуючого знакозмінного моменту навантаження РЛС.

У зв'язку з обмеженою технологічною можливістю зменшення зубцевого кроку та полюсного ділення ДАД та відсутністю можливості використання редуктора, єдиним способом отримання низьких робочих швидкостей для ДАД є живлення напругою зниженої частоти. Тому буде доцільно розглянути методи частотного керування АД і визначити границі їх застосованості відносно ДАД.

Матеріали досліджень. Класифікація основних методів частотного керування представлена на рис. 1 [3].

Розглянемо можливості застосування існуючих методів частотного керування [3, 5] для дугостаторного асинхронного електропривода.

Компенсація впливу активного опору індуктора (IR-компенсація). При скалярному керуванні АД на частотах в діапазоні $0 \div 10$ Гц реактивний опір його обмоток зменшується ($X_L = 2\pi fL$) і відповідно зменшується спад напруги на індуктивності, а вплив активної частини опору відносно збільшується. Це призводить до ослаблення магнітного поля і, як наслідок, зменшення жорсткості механічної характеристики та перевантажувальної здатності двигуна. Рівняння електричної рівноваги індуктора записується за другим законом Кірхгофа:

$$U_1 = E_1 + I_1 r_1 = E_1 + \Delta U, \quad (1)$$

де $\Delta U = I_1 r_1$ – додаткова напруга, необхідна для компенсації спаду напруги на активному опорі індуктора.

Даний метод дозволяє регулювати кутову швидкість АД з критичним моментом і статизмом, близькими до природної механічної характеристики в діапазоні близько 10:1. Для забезпечення більшої жорсткості характеристики і діапазону регулювання необхідно застосовувати зворотній зв'язок за швидкістю.

Через завищений повітряний проміжок ДАД у порівнянні з АД доводиться суттєво збільшувати намагнічуючу силу обмоток статора, щоб подолати великий магнітний опір зазору. В результаті цього магнітна система ДАД знаходиться у насиченому стані. Як наслідок ще більше зменшується питома доля реактивних опорів статора і ротора у порівнянні з відповідними активними опорами. Тому можна говорити про доцільність застосування методу IR-компенсації для ДАД, однак потрібно враховувати вплив крайових ефектів.

Компенсація впливу повного опору індуктора (IZ-компенсація). Для компенсації спаду напруги на обмотках АД збільшують вхідну напругу залежно від навантаження.

Метод включає наступні модифікації [5]:

компенсація в скалярній формі:

$$\begin{aligned} \Delta u_{1\alpha} &= \Delta u_{1\alpha} = i_{1\alpha} z_1 = i_{1\alpha} \sqrt{r_1^2 + (x_{1\sigma \text{ ном}} \alpha)^2}, \\ \Delta u_{1\beta} &= 0; \end{aligned} \quad (2)$$

компенсація в векторній формі:

$$\begin{aligned} \Delta u_{1\alpha} &= i_{1\alpha} r_1 - i_{1\beta} x_{1\sigma \text{ ном}} \alpha \\ \Delta u_{1\beta} &= i_{1\beta} r_1 - i_{1\alpha} x_{1\sigma \text{ ном}} \alpha \end{aligned} \quad (3)$$

де i_1 – струм обмотки статора, r_1 – активний опір обмотки статора, $x_{1\sigma \text{ ном}}$ – індуктивність розсіювання обмотки статора, $\alpha = f_1 / f_n = \omega_1 / \omega_n$ – частота струму статора.

Принциповою відмінністю режиму IZ-компенсації є відсутність насичення магнітопроводу при будь-яких частотах і навантаженнях, тому що напруга кола намагнічування підтримується постійною і рівною напрузі в режимі холостого ходу.

Для стабілізації потоку у всьому діапазоні зміни частоти і моменту необхідно збільшувати напругу живлення приблизно в два рази, що не завжди можливо в силу технічних характеристик двигуна. Щоб стабілізувати електромагнітний потік необхідно вимірювати напругу чи струм статора або потік в повітряному проміжку, що дещо ускладнює реалізацію даного метода. Для підвищення жорсткості характеристик та одержання більшого діапазону регулювання використовують зворотний зв'язок за швидкістю.

Метод компенсації впливу повного опору індуктора може застосовуватися і для ДАД за умови врахування крайових ефектів. Оскільки в ДАД переважний вплив на характеристики двигуна має активна складова опору статора, а даний метод значно складніший у реалізації, більш доцільно буде застосовувати метод компенсації активного опору індуктора. На рис. 2 представлені механічні характеристики АД при застосуванні частотного керування з IR- та IZ- компенсацією [5].

Використання натуральної орієнтації по вектору потокозчеплення ротора ґрунтується на представленні АД в динамічній формі з використанням другого методу Ляпунова.

Формування заданого потокозчеплення статора дозволяє модифікувати механічні характеристики частотно-

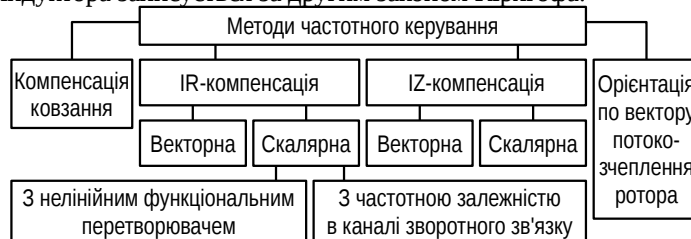


Рис. 1 Класифікація методів частотного керування АД

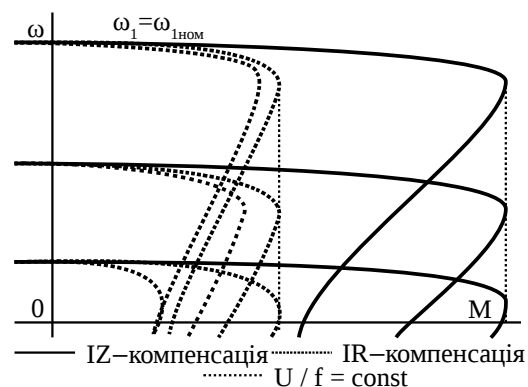


Рис. 2 Механічні характеристики АД при різних модифікаціях частотного керування

керуваного АД залежно від заданої кутової швидкості. Значення заданого потоку двигуна, при якому перевантажувальна здатність зберігається на номінальному рівні, дорівнює [6]:

$$\psi^* = \psi_n^* \sqrt{\frac{\omega^* p_n z (\alpha_1^2 + \omega_{0n}^2)}{\omega_{0n} z_n (\alpha_1^2 + (\omega^* p_n)^2)}} \quad (4)$$

де коефіцієнт $\alpha_1 = r_1 / L_1$; ω^* , ψ^* – задані значення кутової швидкості і модуля потокозчеплення статора; p_n – число пар полюсів; z , z_n – повні опори; ψ_n^* – номінальне потокозчеплення, ω_{0n} – швидкість холостого ходу.

Даний метод дозволяє підтримувати значення критичного моменту частотно–керуваного АД на номінальному рівні шляхом формування заданого потокозчеплення статора залежно від заданої кутової швидкості. Реалізація даного методу керування може бути здійснена без використання спеціалізованих датчиків регульованих координат на основі спостерегаців. В той же час внаслідок насичення магнітопроводу ДАД складові магнітного потоку стають малокеруваними, що ускладнює реалізацію даного методу.

Компенсація ковзання. В АД має місце ефект ковзання – відставання швидкості обертання ротора від магнітного поля, що створюється обмотками статора. При чому цей ефект присутній і в режимі реального холостого ходу, а зі збільшенням навантаження його величина зростає. Режим компенсації ковзання полягає у зміні частоти живлення АД в залежності від навантаження на валу, тобто, фактично від струму статора. Даний метод дозволяє підвищити жорсткість механічної характеристик АД та збільшити діапазон регулювання швидкості до значення 20:1. Може застосовуватися у поєднанні з іншими методами, наприклад, з IR –компенсацією.

Для ДАД режим компенсації ковзання полягає в усуненні похибки робочого ковзання при одночасній компенсації впливу кінцевих ефектів і активного опору індуктора. З цією метою у рівняння динаміки ДАД та схему заміщення вводиться функція $f(Q)$, яка враховує вплив кінцевих ефектів на основі моделі Данкана [7, 8]:

$$f(Q) = \frac{1 - e^{-Q}}{Q}; \quad Q = \frac{lR_2}{vL_2} \quad (5)$$

де l – довжина індуктора; v – швидкість БЕ; r_2 , L_2 – активний опір та індуктивність вторинного елемента. Для роботи алгоритму керування ДАД необхідне вимірювання швидкості, коефіцієнта потужності, струму індуктора, а також відомості про активний опір і індуктивність індуктора та активний опір вторинного елемента.

Після огляду різних модифікацій методу частотного керування для АД можна зробити висновок, що для ДАД доцільно буде застосовувати комбіновані методи, які враховують розглянуті вище його конструктивні особливості.

Для побудови функціональної схеми комбінованого частотного керування ДАД скористаємося залежностями для стандартного АД. Такий підхід можна пояснити тим, що в алгоритмі керування ДАД буде застосовано метод компенсації впливу активного опору обмотки статора r_1 , а також компенсація крайових ефектів на основі моделі Данкана. Механічна характеристика АД при відсутності компенсації опору обмотки статора представляється у вигляді уточненої формули Клосса [5]:

$$M = 2 M_k \cdot \left[\left(1 + \frac{r_1}{r_2} \right) / \left(\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} + 2 s_k \frac{r_1}{r_2} \right) \right] \quad (6)$$

де s_k – критичне ковзання, M_k – критичний момент, r_2 – активний опір обмотки ротора, приведений до обмотки статора.

За наявності компенсації впливу опору обмотки статора прийемо $r_1 = 0$. Тоді для ДАД залежність (6) прийме спрощений вид:

$$M = 2 M_k \cdot \left[1 / \left(\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} \right) \right] \quad (7)$$

Якщо у формулу (7) замість M і M_k підставити номінальні значення M_n , s_n , то можна отримати вираз для розрахунку критичного ковзання [5]:

$$s_k = s_n \left(\lambda \pm \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) \quad (8)$$

де $\lambda = M_k / M_n$ – перевантажувальна здатність двигуна.

Для рушійного режиму роботи формула (8) матиме вид:

$$s_k = s_n \left(\lambda - \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) \quad (9)$$

Критичному ковзанню s_k відповідає електрична частота БЕ:

$$f_2 = f_{1n} s_k \quad (10)$$

Враховуючи (7) і (10), f_2 можна переписати:

$$f_2 = f_{1n} s_k \left(\left(\lambda - \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) \right) \quad (11)$$

Механічний момент на валу ДАД можна визначити за співвідношенням:

$$M_c = \frac{P}{\omega} \quad (12)$$

де P – активна потужність, яка передається від індуктора до вторинного елемента через повітряний проміжок;

ω – фактична кутова швидкість ротора ДАД.

Потужність P можна представити у вигляді [8]:

$$P = 3 U_1 I_1 \cos \varphi (1 - f(Q)) - I_1^2 r_1; \quad (13)$$

де U_1 , I_1 - фазні напруга і струм індуктора, $\cos \varphi$ коефіцієнт потужності, r_1 активний опір статора

Оскільки в системі ЕП РЛС використовується зворотній зв'язок за швидкістю, (5) можна переписати:

$$Q = \frac{IR_2}{vL_2} = \frac{IR_2}{\omega R_d L_2}, \quad (14)$$

де R_d - радіус дуги двигуна.

На основі (1,7÷14) була побудована функціональна схема комбінованого методу частотного керування ДАД з урахуванням крайових ефектів та з компенсацією активного опору індуктора, представлена на рис. 3. Вихідною величиною є кутова швидкість ω , яку потрібно підтримувати на заданому рівні, що реалізується на базі звичайного ПІ-регулятора. Оскільки для ЕП навігаційних РЛС ключовими вимогами є висока стабільність швидкості та точність визначення кутового положення [2], використання зворотнього зв'язку за швидкістю є необхідним. Напруга та частота з індексами (**) являються сформованими величинами за законом $U / f = const$. У верхній частині схеми, цифрами всередині блоків, вказані номери формул, які розраховуються.

Для реалізації даного алгоритму окрім кутової швидкості ротора, потрібно вимірювати фазні струми та напруги індукторів. Щоб розрахувати потужність за формулою (13) потрібно знати коефіцієнт потужності $\cos \varphi$. Його можна визначити шляхом вимірювання часу переходу синусоїди струму та напруги через нуль, або розрахувати аналітичним методом з формули потужності. Також необхідно знати активний та індуктивний опір індукторів та ВЕ (ротора).

Висновки. В статті проведено аналіз ефективності застосування існуючих методів частотного керування для дугостаторного електропривода суднової навігаційної РЛС. Представлено критерії вибору методу частотного керування, спираючись на специфіку ДАД та вимоги до РЛС. В ДАД мають місце крайові ефекти, обумовлені розімкнутим магнітопроводом, насиченням магнітопроводу, збільшенням повітряним проміжком, ефекти «входу-виходу» електромагнітного поля, які призводять до викривлення картини магнітного поля в зазорі, асиметрії струмів у фазах індукторів і, як наслідок, до зменшення енергетичних та експлуатаційних показників електропривода. Тому при синтезі законів керування ДАД необхідно враховувати його конструктивні, а відповідно і електромеханічні особливості. Було запропоновано функціональну схему частотного керування для ДАД з урахуванням крайових ефектів та з компенсацією активної складової опору обмоток статора.

Список літератури: 1. Волков І.В. Безредукторная электромеханическая система с дугостаторным электроприводом для радиолокационной станции. Волков І.В., Стяжкін В.П., Милько Р.Э., Доманский Г.В. // Електротехнічні комплекси та системи / Тематичний випуск "Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика". - Київ, 2011. - Випуск 03 (79). - С. 248-252. 2. Стяжкін В.П. Автоматизована система керування безредукторними електроприводами суднових навігаційних РЛС / В.П. Стяжкін, С.І. Гаврилюк // Електроніка та зв'язок. Науково-технічний журнал. - Київ: Том 21, №4 (93), 2016. 3. Теряєв В.І. Особливості частотного керування лінійними асинхронними електродвигунами // В.І. Теряєв, М.В. Михайлов, М.А. Хитко. - Доповіді за матеріалами Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. Сучасні проблеми електроенергетичної та автоматики. - Київ: "Політехніка", 2014. - с. 248-249. 4. Сарапулов Ф.Н. Математические модели линейных индукционных машин на основе схем замещения / Ф.Н. Сарапулов, С.Ф. Сарапулов, П. Шымчак. Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2001. - 236 с. 5. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями // А.А. Усольцев; СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. - 94 с. 6. Пересада С.М. Обобщенный алгоритм частотного управления асинхронными двигателями. Часть 2: результаты тестирования. Пересада С.М., Ковбаса С.Н., Онанко А.Ю. // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. - Кременчук: КрНУ, 2011. - Вип. 2/2011 (14). - С. 17 - 21. 7. J. Duncan. Linear induction motor equivalent circuit model. J. Duncan. // Proc. Inst. Elect. Eng. B—Elect. Power Appl., vol. 130, no. 1, pp. 51-57, Jan. 1983. 8. Теряєв В.І. Алгоритм скалярного керування лінійним асинхронним двигуном із компенсацією впливу кінцевих ефектів / В.І. Теряєв, М.О. Островерхов // Електротехнічні та комп'ютерні системи. Науково-технічний журнал. - Київ: "Техніка", 2011. - с.32-34.

Bibliography (transliterated): 1. Volkov I.V. Bezreduktornaya elektromekhanicheskaya sistema s dugostatornyum elektropriivodom dlya radiolokatsionnoy stantsii. Volkov I.V., Stiazhkin V.P., Mylko R.E., Domanskyi H.V. // Elektrotekhnichni kompleksi ta systemy / Tematichnyi vypusk "Problemy avtomatyzovanoho elektropriivoda. Teoriia i praktika". - Kyiv, 2011. - Vypusk 03 (79). - S. 248-252. 2. Stiazhkin V.P. Avtomatyzovana systema keruvannia bezreduktornymy elektropriivodamy sudnovykh navihatsiinykh RLS // V.P. Stiazhkin, S.I. Gavryluk // Elektronika ta zviazok. Naukovo-tekhnichnyi zhurnal. - Kyiv: Tom 21, №4 (93), 2016. 3. Teryaev V.I. Osoblyvosti chastotnoho keruvannia liniinymy asynkhronnymy elektrodvyhunamy / V.I.Teryaev, M.V.Mykhailov, M.A.Khytko. - Dopovidy za materialamy Mizhnarodnoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantiv i studentiv. Suchasni problemy elektroenerhotekhniki ta avtomatyky. - Kyiv: «Politekhnik», 2014. - s. 248-249. 4. Sarapulov F.N. Matematycheskye mode-ly lineynux unduktrornux mashyn na osnove skhem zameshcheniya // F.N. Sarapulov, S.F. Sarapulov, P.Shumchak. Ekaterynburh: Yzd-vo UHTU-UPY, 2001. - 236 s. 5. Usoltsev A.A. Chastotnoe upravlenye asynkhronnymy dvihateliamy / A.A. Usoltsev; SPb: SPbHU YTMO, 2006. - 94 s. 6. Peresada S.M. Obobshchennuy alhorytm chastotnoho upravleniyya asynkhronnymy dvihateliamy. Chast' 2: rezultatu testyrovaniya. Peresada S.M., Kovbasa S.N., Onanko A.Yu. // Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy. - Kremenchuk: KrNU, 2011. - Vyp. 2/2011 (14). - S. 17 - 21. 7. J. Duncan. Linear induction motor equivalent circuit model. J. Duncan. // Proc. Inst. Elect. Eng. B—Elect. Power Appl., vol. 130, no. 1, pp. 51-57, Jan. 1983. 8. Teryaev V.I. Alhorytm skaliarnoho keruvannia liniinym asynkhronnym dvihunom iz kompensatsiieyu vplyvu kintsevykh efektiv / V.I. Teryaev, M.O. Ostroverkhov // Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy. Naukovo-tekhnichnyi zhurnal. - Kyiv: «Tekhnika», 2011. - s. 32-34.

Надійшла 19.06.2017